

中国沿海主要港口推荐航线算法及其实现

吕超¹, 胡勤友¹, 向哲¹, 周佳²

(1. 上海海事大学 商船学院, 上海 201306; 2. 交通运输部东海航海保障中心, 上海 200080)

摘要: 为弥补现有船舶电子海图导航系统不能进行航线自动规划的不足, 通过整理《中国航路指南》中的转向点, 建立转向点关系库, 进而形成中国沿海主要港口间的航线网络. 利用静态路网中求解最短路径的 A* 算法, 引入恒向线航法计算公式作为 A* 算法的启发式函数, 设计并实现中国沿海主要港口推荐航线算法. 实验结果表明, A* 算法能够有效、便捷地规划出船舶航行的安全航线. 该算法可应用于电子海图显示与信息系统 (Electronic Chart Display & Information System, ECDIS) 等, 可为我国沿海航行的船舶自动推荐《中国航路指南》中的航线, 给船舶航行提供参考, 对科学航海、船舶安全航行和船员减压等具有实践意义.

关键词: 交通运输; 推荐航线; A* 算法; 电子海图; 恒向线航法

中图分类号: U675.79; U675.83

文献标志码: A

Route recommendation algorithm and its implementation for Chinese major coastal ports

LYU Chao¹, HU Qinyou¹, XIANG Zhe¹, ZHOU Jia²

(1. Merchant Marine College, Shanghai Maritime Univ., Shanghai 201306, China;

2. Donghai Navigation Safety Administration, Ministry of Transport, Shanghai 200080, China)

Abstract: To make up the shortage that the existing ship electronic chart navigation system cannot support the automatic route planning, the route network among Chinese major coastal ports is formed by constructing a waypoint-relationship base, where the waypoints are collected from *China Sailing Directions*. Then, the A-star algorithm that is used to search for the shortest path in a static network is used and the formula of rhumb line sailing is introduced as the heuristic function of the A-star algorithm to design and realize the route recommendation algorithm for Chinese major coastal ports. The experimental results show that the A-star algorithm can plan a safety route effectively and easily for ship sailing. The algorithm can be applied to Electronic Chart Display & Information System (ECDIS) or similar ship navigation systems, can recommend the routes in *China Sailing Directions* automatically for ships sailing on China's coastal waters, and can provide reference for ship sailing. It has a practical significance for scientific sailing, ship navigation safety and relieving crew stress.

收稿日期: 2015-03-12 修回日期: 2015-04-30

基金项目: 上海市人才发展基金(201436)

作者简介: 吕超(1990—), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 硕士研究生, 研究方向为交通运输安全保障与防护技术研究,

(Email) lvchao_0207@163.com;

胡勤友(1974—), 男, 安徽舒城人, 教授, 博士, 研究方向为智能船舶与海事信息处理 (E-mail) qyhu@shmtu.edu.cn

<http://www.smujournal.cn>

hyxb@shmtu.edu.cn

Key words: transportation; ship route recommendation; A-star algorithm; electronic chart; rhumb line sailing

0 引言

随着地理信息系统 (Geography Information System, GIS) 技术的日益发展, 导航地图软件在陆上交通领域得到广泛的应用, 如百度地图、谷歌地图等。路径规划是这些导航地图软件的重要技术之一, 它也广泛应用于无人机、智能机器人领域, 以及游戏中的路线设计。

近年来, 有关路径规划算法的研究很多, 且多针对最短路径问题^[1]。最短路径问题, 通常指的是带权图上的最短路径问题。常用的路径规划算法有单个物体寻径算法^[2]、遗传算法^[3]、蚁群算法^[4]、Dijkstra 算法、A* (A-star) 算法等。徐琼等^[5]基于遗传算法, 引入新的交叉算子, 解决最短路径问题, 但该算法效率不高。靳凯文等^[6]利用蚁群算法, 解决车载导航系统中的最短路径搜索问题。蚁群算法虽然具有较低的空间复杂度, 但时间复杂度较高, 在运算过程中仍不可避免地出现局部最优或停滞^[6]。Dijkstra 算法作为传统的最短路径算法被 PEYER 等^[7]应用于 VLSI 布线领域, 以配置最优集成电路布线方案。A* 算法是基于 Dijkstra 的算法, 但比 Dijkstra 算法更高效。熊伟等^[8]将 A* 算法应用在部队机动最短路径优化方面, 并对结果进行分析验证, 结果表明运用 A* 算法比运用 Dijkstra 算法在效率上提高 40% 左右。

陆上交通有路网, 而海上交通没有固定的路网存在。相比于成熟的陆上交通规划, 船舶航线的规划研究还不完善。聂皓冰等^[9]改进蚁群算法, 提高运行效率, 并将其应用于海上搜救领域; 吴凤平等^[10]应用 Dijkstra 算法对船舶最小事故航线选择方法进行研究; 叶清等^[11]通过改进 Dijkstra 算法, 采用从起点和终点双向规划的方法, 提高算法的效率, 并实现多条航线的优化选择; 王德春等^[12]用 A* 算法, 在叶清等^[11]的研究基础上, 进一步提高航线的搜索效率。然而, 这些研究还没有达到可以实际应用的程度。

在船舶开航前, 二副需要根据航海图书、海图等资料为船舶设计航线, 而现有的电子海图导航系统只能导入和绘制航线, 不能进行航线自动规划, 实质上并不能减少太多的工作量。本文综合以上研究, 从《中国航路指南》^[13-15]中整理出中国沿海航线的转向点, 建立中国沿海主要港口间的海上路网, 再利用

A* 算法, 选用恒向线航法计算公式作为启发式函数, 最终设计并实现中国沿海推荐航线算法。

1 A* 算法

A* 算法是静态路网中求解最短路径最有效的方法。^[16] A* 算法是在典型的 Dijkstra 算法基础上加入一种启发式的算法。Dijkstra 算法是解决两点之间最小费用的有效算法, 最基本的思想是: 在网格图中, 从起始网格开始向周围网格遍历、比较, 最终找到终点网格位置。显然, 这种全局遍历的方法是低效的。地图寻径的方法还有单个物体寻径算法、蚁群算法、遗传算法等。与这些求最短路径的算法相比, A* 算法能够更快求出状态空间中的最短路径。应用启发式函数可以缩小 A* 算法的搜索范围, 提高运算速度。

A* 算法的公式为

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (1)$$

式中: $f(n)$ 表示从起点经由点 n 到达终点的估价函数; $g(n)$ 表示在状态空间中从起点到达点 n 的实际代价; $h(n)$ 表示从点 n 到达终点的估算代价, 也称为启发式。A* 算法就是通过比较每一个可选点的估价函数, 选出 $f(n)$ 值最小的点作为最优选择, 最终找到最优路径。其中, 启发式 $h(n)$ 的算法选取很重要。当 $h(n) \leq$ 点 n 到终点的实际价值时, 搜索的点较多, 搜索的范围也很大, 效率较低, 但能得到最优解。当 $h(n) >$ 点 n 到终点的实际价值时, 搜索范围小, 效率较高, 但不能保证得到最优解。在网格地图中常见的启发式函数算法有曼哈顿距离、对角线距离、欧几里得距离等。根据不同的应用需求对应选择合适的启发式算法。

2 转向点关系库

传统的 A* 算法需要将所求区域网格化, 并定义可行域。沿海海域太大, 环境复杂, 网格的大小不易设置, 因此不适合网格化。另外, 如果定义可行域, 需要对沿海水文信息、暗礁沉船等进行统计和测绘。本文在 A* 算法基础上进行改进, 构建转向点关系库代替网格化地图, 并应用航海专业公式作为启发式函数的运算公式。转向点取自最新版《中国航路指南》^[13-15], 可以保证推荐航线的安全性。构建转向点关系库, 能够避免沿海海域太大不适合网格化的问题。

在实现算法前,首先要对已有转向点进行整理和编号。《中国航路指南》共3册,分为黄渤海海域、东海海域和南海海域。为保证转向点的唯一性,根据不同海域及转向点的特点,采用6位编码对转向点进行编号:第1位表示所在海域,“1”表示黄渤海海域,“2”表示东海海域,“3”表示南海海域;第2位表示是否为港口点,“1”代表“是”,“0”代表“否”;第3位表示该点可连接节点的个数,考虑到沿海航线情况,最多可连接节点少于10个,故用1位表示;后3位是该点的编号,用于为同一海域的转向点编号。大连港编号见图1。

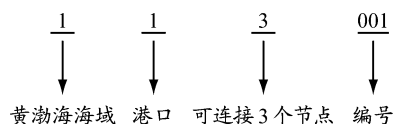


图1 大连港编号

对转向点编号后,构建关系库。在数据库中,每个转向点的属性包括经纬度、可连接节点编号、备注内容。《中国航路指南》中部分港口间没有详细的推荐航线,但沿途有合适的转向点,因此可根据该指南上的描述,通过增添一些转向点,并建立关系,在海图上进行航线设计。对一些存在风险的点要进行相应的剔除。整理后的沿海转向点数据库共包含161个转向点,其中包括沿海港口转向点35个。

3 基于A*算法的推荐航线

3.1 启发式函数

根据航线规划的实际情况,通过建立转向点关系库取代网格化。一方面可以适应沿海的实际海况,另一方面还可以提高算法的运行速度。

在A*算法中,最关键的是启发式函数的选取。本文采用航海学中求取两点恒向线航程和航向的计算公式作为启发式函数。恒向线航线不是地球表面上两点之间的最短航程航线(子午线和赤道除外),但在中低纬度或航向接近南北方向时或航程不长时,它与最短航线相差不大,且操作方便。^[17]我国沿海航线纬度低,航程相对较短,多为南北方向,所以根据沿海航线的实际情况,采用恒向线航法计算公式能基本保证算法的效率,且结果最优。相关公式为

$$M = 7\,915.704\,471 \lg \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) - 23.0 \sin \varphi \quad (2)$$

$$C = \arctan\left(\frac{|\Delta\lambda|}{\Delta M}\right) \quad (3)$$

$$S = \Delta\varphi \sec C \quad (4)$$

式中: M 为纬度渐长率; φ 为纬度; $\Delta\lambda$ 为两点经度

差; ΔM 为两点间纬度渐长率之差; S 为恒向线航程; $\Delta\varphi$ 为两点纬度差; C 为航向。

在求取航向 C 的过程中,计算值 C 为 0° 到 90° , 第一名称与 $\Delta\varphi$ 或 ΔM 相同,第二名称与 $\Delta\lambda$ 相同,最后转化为圆周航向。^[17]在用式(4)计算航程 S 时,应用的是圆周航向值。

求取状态空间中从起点到达点 n 的实际代价 $g(n)$ 也应用式(4)。恒向线航法计算公式的应用,不但满足算法的要求,还适合我国沿海的实际情况,可确保航线的安全性、准确性。

3.2 算法流程

在A*算法执行过程中,采用定义父节点、追踪父节点属性的方法还原搜索的轨迹。在定义父节点时采用一次定义法,定义父节点属性后将不再更改。算法执行结束后,反向追踪CLOSED表中父节点属性,一步步绘制航线。

A*算法具体运算步骤如下:

步骤1 构建两个表,分别为OPEN表和CLOSED表。OPEN表用于放置待检查的转向点,CLOSED表用于放置已检查的转向点,避免重复计算。CLOSED表初始状态为空,OPEN表中起始点为 S 。

步骤2 检查起始点 S 附近的可连接转向点,忽略不可行转向点及CLOSED表中的转向点。将可行点加入OPEN表中,并把点 S 设为这些转向点的父节点(不再改变)。

步骤3 将起始点 S 加入CLOSED表中,并计算新加入的转向点的 $f(n)$ 值。

步骤4 将 $f(n)$ 值最小的转向点加入CLOSED表中,然后将与其相邻的可连接转向点加入OPEN表中,忽略已在CLOSED表中的点。把刚刚加入CLOSED表中的点作为这些新转向点的父节点。

步骤5 如果某个相邻的转向点已经在OPEN表中,那么检验通过该转向点的路径是否更优,也就是检验该转向点的 $f(n)$ 是否更小。如果不是更小,则不作操作。如果更小,说明直接选取该点更优。更新OPEN表和CLOSED表。

步骤6 循环以上操作,直到OPEN表为空,或OPEN表中出现终点。

具体算法流程见图2。

4 应用

将设计的算法应用到电子海图中。图3是秦皇岛港到青岛港的推荐航线以及所用转向点,两港口

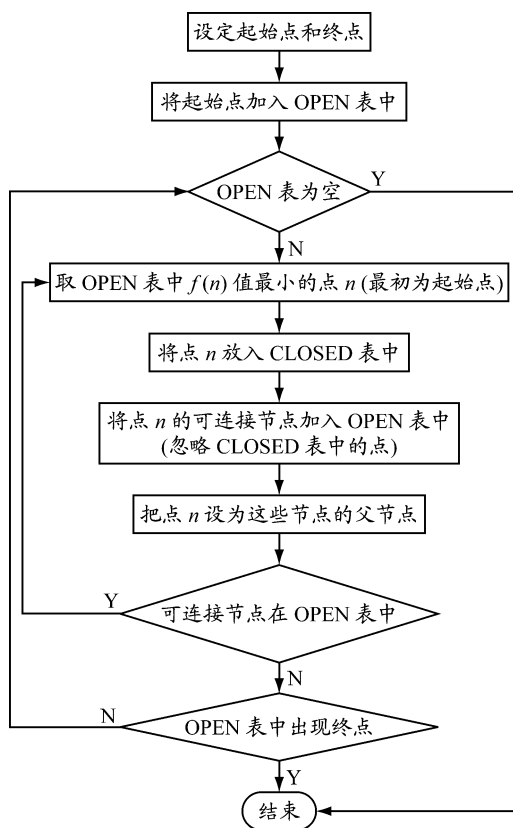


图2 A* 算法流程

属于黄渤海海域,航线涉及转向点11个。A* 算法的实现原理保证所推荐航线是两目标港口之间有效航线中的最短航线。由于船舶的航次计划、船舶的吃水以及其他影响船舶航行的要素不同,在实际应用过程中还需根据船舶自身情况以及途经海域的天气情况进行检验,并适当调整。

本文所研究的算法已被应用于东海航海保障中心公益项目“海e行”中国海事电子航行示意图APP中。“海e行”APP可为沿海中小型船舶提供定位、导航、电子航行示意图在线访问和离线包下载、

参考文献:

- [1] 王海梅. 基于GIS的最优路径算法研究与实现[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [2] 张前哨. 基于A*算法的地图寻径的研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2005.
- [3] 王坤. 基于遗传算法的移动机器人路径规划研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [4] DORIGO M, GAMBARDELLA L M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem[J]. IEEE Trans Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 53-66.
- [5] 徐琼, 陈荣清, 官云兰, 等. 基于遗传算法最短路径问题的探讨[J]. 华东地质学院学报, 2003, 26(2): 168-172.
- [6] 靳凯文, 李春葆, 秦前清. 基于蚁群算法的最短路径搜索方法研究[J]. 公路交通科技, 2006, 23(3): 128-130, 134.
- [7] PEYER S, RAUTENBACH D, VYGEN J. A generalization of Dijkstra's shortest path algorithm with applications to VLSI routing[J]. J Discrete Algorithms, 2009, 7(4): 377-390.
- [8] 熊伟, 张仁平, 刘奇韬, 等. A* 算法及其在地理信息系统中的应用[J]. 计算机系统应用, 2007(4): 14-17.
- [9] 聂皓冰, 王胜正, 胡志武, 等. 航线动态优化算法在海上搜救中的应用[J]. 上海海事大学学报, 2011, 32(4): 1-6.

(下转第28页)

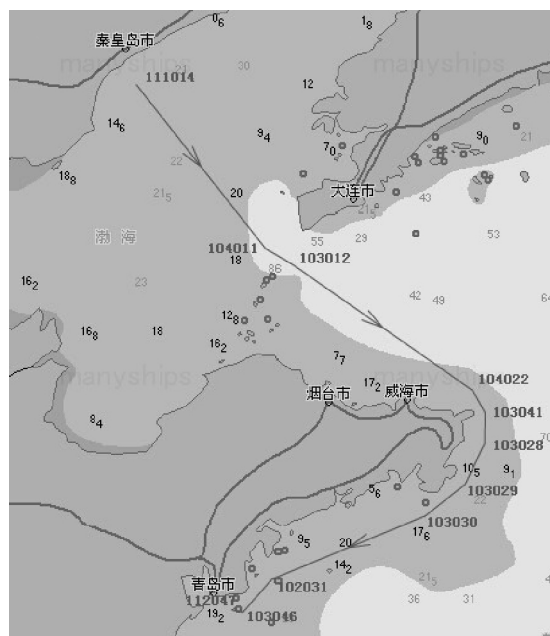


图3 应用A* 算法得到的秦皇岛港到青岛港推荐航线

航海通告和推荐航线等服务,其中推荐航线服务采用的就是本文的算法。通过不断完善可以提供更优质、更丰富的服务。

5 结束语

应用A* 算法,参考《中国航路指南》中的推荐航线,设计并实现沿海推荐航线算法。在设计过程中,对沿海转向点进行整理和编辑,构建转向点关系库。应用恒向线航法计算公式作为算法的启发式函数,最终通过在海图上绘制实现航线的推荐。结果证明,该算法可以快速推荐出中国沿海主要港口间安全且里程最短的航线,为船舶航行提供参考,对船舶的安全航行、船员减压等提供有利的帮助。在今后的研究中,可以考虑为不同的船舶类型推荐个性航线,为更多船舶提供更加安全、可靠的航线。

集、船舶信息采集、航道信息采集、航标等级生成、航标等级查询、人工修正、平台互联和系统维护等功能. 实现内河航标分级管理的流程见图3.

5 结束语

航标是保障船舶安全航行的重要助航设施,合理、完善、科学的航标配布体系可以给船舶提供优质的助航服务,反之,则会给水上交通带来巨大风险. 本文作为探索性研究,目的是寻找一种科学划分航标等级的方法,并运用分级的手段弥补航标配布实践过程中暴露的一些缺陷,使航标配布更加科学、合理,内河航标配布体系更加完善.

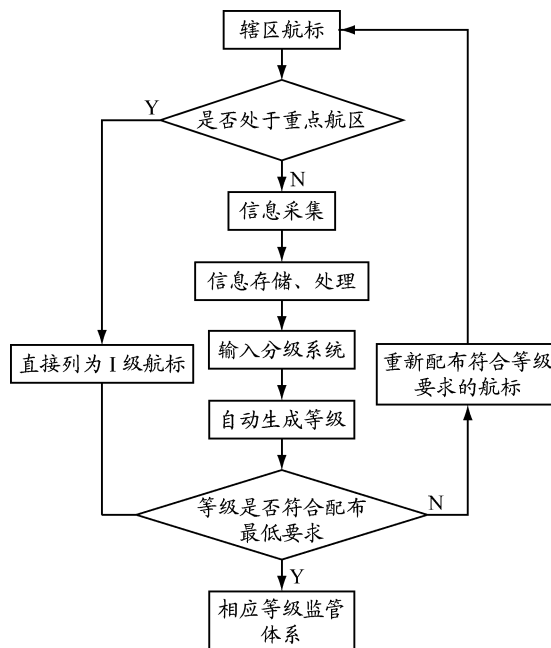


图3 内河航标分级管理流程

参考文献:

- [1] 宋成果. 基于虚拟现实的內河航道航标布设的仿真研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [2] 黄前坚. 航标效能评估方法与指标体系的研究[C]//中国航海学会航标专业委员会2007年沿海内河航标学组联合年会论文集. 北京: 中国航海学会航标专业委员会, 2007: 542-543.
- [3] 张继军. 航标效能定量评价的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2004.
- [4] 王高耀, 梁小成. 基于航行风险的船舶交管系统的分级管理[J]. 中国航海, 2010, 33(3): 47-50.
- [5] 包雄关, 王春临. 内河搜救风险评估模型[J]. 中国航海, 2014, 37(1): 94-98.
- [6] JT 759—2009, 海区航标效能验收规范[S].
- [7] 王如政. 航标效能定量评估方法[J]. 大连海事大学学报, 2011, 37(3): 39-42.
- [8] 陈诚. 海上风险预警分级研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2013.
- [9] 夏海波, 张蒙蒙, 胡基平, 等. 船舶安全航行系统风险分级 ANFIS 模型[J]. 上海海事大学学报, 2014, 35(2): 17-20.
- [10] 刘林, 曹艳平, 王婷, 等. 应用模糊数学[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2008: 133-134.
- [11] 许树柏. 层次分析法原理[M]. 天津: 天津大学出版社, 1998: 10-12.
- [12] 郭建国. 港口水域航标配布的综合评判[D]. 大连: 大连海事大学, 2000.
- [13] 柴进柱. 大连港航标管理水平的评估及其航标综合改造工程方案的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2004.
- [14] GB 5863—1993, 内河助航标志[S].
- [15] 范晓颺. 内河引航技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003: 175-220.

(编辑 贾裙平)

(上接第23页)

- [10] 吴凤平, 朱振春. 船舶最小事故航线选择方法研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2001, 29(1): 77-79.
- [11] 叶清, 郁振伟. 改进最短路径算法在最佳航线选择中的应用[J]. 中国航海, 2003(2): 17-19.
- [12] 王德春, 陈利敏, 张孝芳. 基于 A* 算法的舰船最佳航线选择[J]. 青岛大学学报(自然科学版), 2005, 18(4): 10-13.
- [13] 中国解放军海军司令部航海保证部. 中国航路指南(A101)[M]. 天津: 中国航海图书出版社, 2011: 38-49.
- [14] 中国解放军海军司令部航海保证部. 中国航路指南(A102)[M]. 天津: 中国航海图书出版社, 2010: 33-41.
- [15] 中国解放军海军司令部航海保证部. 中国航路指南(A103)[M]. 天津: 中国航海图书出版社, 2011: 29-41.
- [16] LUGER G. 人工智能: 复杂问题求解的结构和策略[M]. 4版. 北京: 机械工业出版社, 2004: 5-50.
- [17] 赵仁余. 航海学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2009: 139-141.

(编辑 贾裙平)